Folhetim

FOLHA DE S. PAULO—SÁBADO, 1º DE OUTUBRO DE 1988—Nº 611

Capa sobre foto de Jacques-Henri Lartigue ("Bouboutte, Rouzat, 1908")

DO UNIVERSO DA FÍSICA

Eric Alliez
Mario Novello
Luis Alberto Oliveira
José Martins Salim

G-7
FOLHA DE S. PAULO
São Paulo, 1º de outubro de 1988

Entre Física e Filosofia

M. NOVELLO, L. A. OLIVEIRA, J. M. SALIM

MARIO NOVELLO É PESQUISADOR-CHEFE DO GRUPO DE COSMOLOGIA E GRAVITAÇÃO DO CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS DO RIO DE JANEIRO; LUIZ ALBERTO OLIVEIRA E JOSÉ MARTINS SALIM SÃO PESQUISADORES DO MESMO CENTRO

O "MUNDO OBJETIVO" SERIA A EXPRESSÃO DE UMA TRAMA DE RELAÇÕES QUÂNTICAS QUE NÃO PADECEM DE "OBJETIVIDADE"

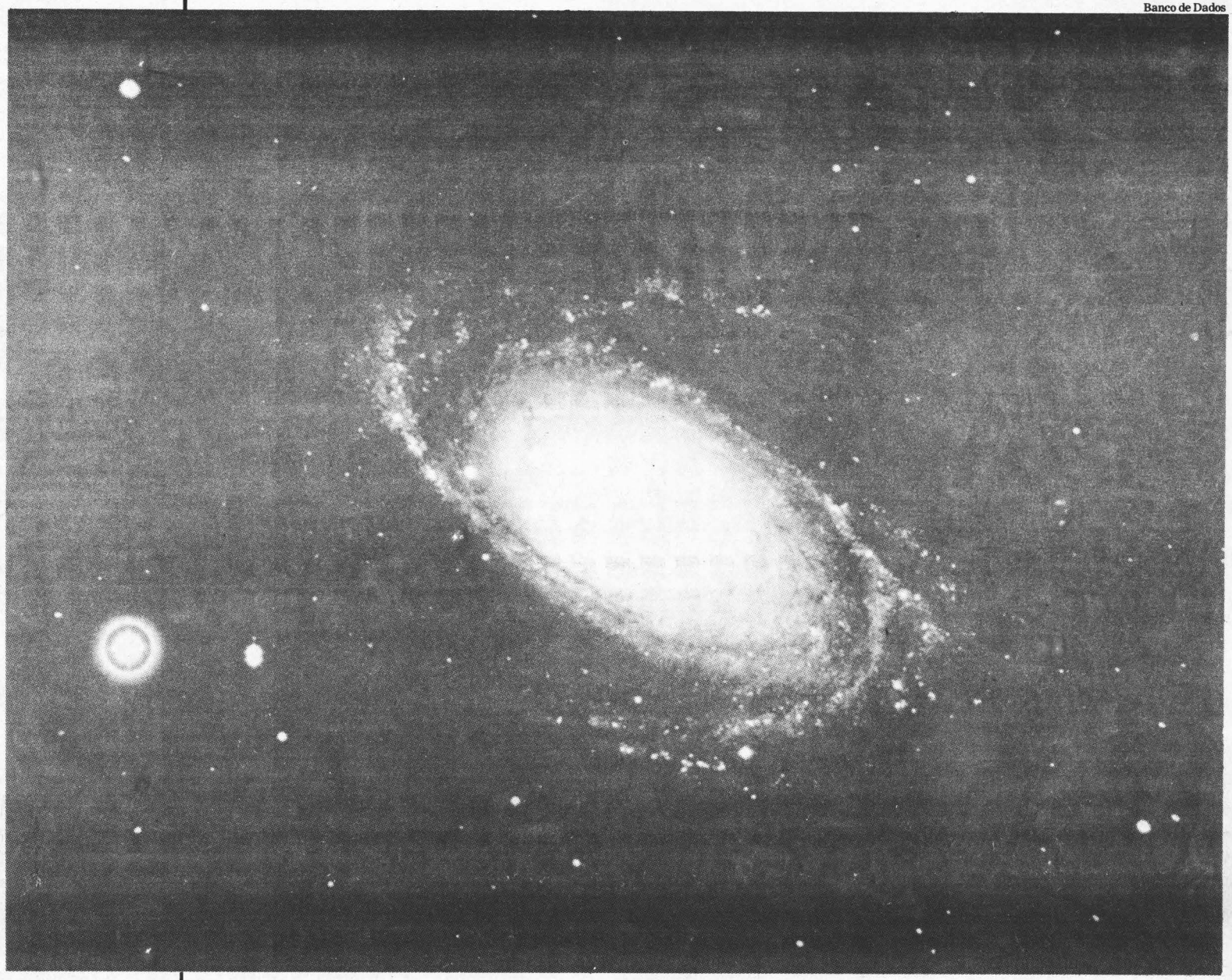
AS PRIMEIRAS DÉCADAS de nosso século testemunharam a deposição e substituição de alguns dos fundamentos mais acreditados da visão de mundo termomecanicista que, a partir da obra gigantesca de Newton, os físicos haviam diligentemente consolidado para abarcar e interpretar, com considerável sucesso, as evidências físicas e astronômicas até então disponíveis. Desfrutando, na época, do auge de sua madurez, o conjunto de princípios e técnicas que hoje denominamos instrumental ou paradigma clássico acumulara importantes triunfos em inúmeros domínios de investigação, sendo tão bem sucedido em assimilar uma variedade de fenômenos térmicos, elétricos e mecânicos, numa escala abrangendo desde a queda de maçãs ao movimento das plantas, que acabou por instalar-se e difundir-se na cultura do Ocidente, em correspondência, uma cosmovisão qualitativa, materialista e reducionista segundo a qual o Universo físico não passaria do análogo de um vasto mecanismo, rigorosamente determinado, analisável com ilimitada precisão e, por conseguinte, inteiramente predizível —refletindo assim uma ambiciosa aspiração a uma totalização maquínica do mundo físico que, como se sabe, logo viria a encontrar sua "hybris".

De fato, a partir da virada do século, experimentos decisivos demonstraram a inadequação das abordagens clássicas no que tange tanto à descrição detalhada da estrutura da matéria e de seus componentes microscópios, quanto à medição de processos compreendendo altas velocidades relativas ou grandes energias, costumeiras em fenômenos astronômicos. Estas observações preludiaram a demolidora conclusão de que, para que se pudesse lograr a correta descrição destas classes de fenômenos alheios à perspectiva humana habitual, seria necessário proceder a uma revisão radical dos próprios princípios segundo os quais as leis clássicas haviam sido edificadas. Assim, doravante os processos microscópicos deverão ser descritos de acordo com as regras descontínuas de quantificação, de natureza essencialmente probabilística, da Mecânica Quântica de Planck, de Broglie e Bohr; o quadro newtoniano clássico de um espaço tridimensional euclidiano, no qual partículas maciças, estáveis e impassíveis coordenam-se pela ação instantânea de forças mecânicas ao longo de um tempo universal e absoluto, cede lugar ao contínuo espaço-tempo quadridimensional de Minkowski e à possibilidade de conversão mútua entre massa e energia, advogados pela teoria da Relatividade Especial de Einstein e, um pouco mais tarde, ao espaço-tempo curvo de Riemann e à identificação entre gravitação e geometria propostos pela teoria da Relatividade Geral. O domínio macroscópico do imensamente grande e o mundo microscópio do infimamente pequeno tornam-se assim as modernas fronteiras do conhecimento físico.

As consequências dessa revolução científica ou transformação de paradigmas (para empregar a denominação de Thomas Kuhn) foram vastas e profundas, descortinando todo um novo panorama conceitual e observacional do mundo físico cuja correta apreciação constitui ainda hoje motivo de densas polêmicas. Com efeito, aspectos como a dessubstancialização da noção de partículas elementares e a indeterminação intrínseca dos processos microfísicos, compreendidos no Princípio da Incerteza de Heisenberg; o caráter dinâmico adquirido, na Cosmologia Relativística, pela estrutura geométrica global do espaço (identificada ao cenário gravitacional de fundo para os eventos físicos locais), o que torna admissível a concepção de um Cosmos ativo e evolutivo; a descoberta de fenômenos de transição cataclísmica de ordem em sistemas complexos ou fora do equilíbrio; a revisão radical das noções de vazio, de caos e de previsibilidade, são alguns exemplos dos agudos problemas de representação e interpretação que estão no cerne das preocupações contemporâneas e que sugerem o questionamento da própria noção básica de realidade física. Procuraremos no que se segue traçar um panorama de algumas das interrelações mais nítidas entre aspectos da Física e da Filosofia buscando abordar, ainda que de forma necessariamente abreviada, certas questões que no cotidiano de nossa atividade de pesquisa nos parecem pertinentes a um domínio propriamente transdisciplinar dos saberes e das ciências.

"Quem não se sentiu chocado com a teoria quântica não pode tê-la compreendido". Este enunciado de Niels Bohr, um dos construtores da moderna teoria quântica, exprime com precisão a perplexidade que costuma acometer os que

Banco de Dados



Nebulosa espiral registrada através de telescópio pelo observatório do monte Palomar, Estados Unidos

tomam contato com as peculiaríssimas concepções envolvidas na descrição quântica dos fenômenos microfísicos. No entanto, é hoje em dia quase unanimemente admitido que a formulação quântica constitui a mais eficaz e bem verificada teoria física já elaborada, tendo sido testada e comprovada num sem-número de experimentos e observações abrangendo desde a estrutura íntima dos núcleos atômicos até as características de objetos estelares como estrelas de nêutrons e pulsares, e cujas consequências práticas vão dos "chips" eletrônicos e da biologia molecular aos lasers e à bomba atômica. Assim, um tanto paradoxalmente, nossa formulação mais compreensiva dos processos físicos parece ser também a menos imediatamente compreensível.

A raiz desta dificuldade provém do fato de que, na perspectiva quântica, os objetos fundamentais sob consideração —átomos, moléculas ou núcleos, por exemplo— não possuem "existência" definida senão a posteriori da observação experimental; além disso, o próprio ato de conhecimento —ou seja o procedimento experimental— inevitavelmente introduz uma perturbação no sistema observado, de modo a ser impossível, mesmo para os mais sofisticados dos aparatos de medida imagináveis, extrair senão uma quantidade limitada de informação acerca do sistema em questão. A introdução desta indeterminação ou incerteza numa instância fundamental de nossa descrição é equivalente —ou poderíamos talvez dizer, manifesta— a uma aleatoriedade básica que seria intrínseca a todos os eventos em escala microscópica. Esse aspecto de indeterminação —e a consequente previsibilidade limitada da evolução dos sistemas quânticos— é um "fato da natureza" na medida em que é uma característica essencial e incontornável de nosso *conhecimento* da natureza. Não podemos apreender mais que uma fração da informação em princípio disponível num dado sistema, e portanto as próprias concepções de "realidade" e de "existência", bem como outras categorias clássicas a que estamos habituados terão que ser vistas a uma nova luz.

Consideremos um exemplo sugestivo do que significa um procedimento de observação em termos quânticos: temos um dado sistema, digamos um átomo, e num dado instante observamos que um de seus elétrons se encontra no estado A. Decorrido um certo período, voltamos a inspecioná-lo e verificamos que o elétron se encontra agora num estado B. Pois bem: nada temos a dizer sobre o sistema *entre* os instantes de observação; não sabemos como o elétron transitou de A para B, ou quais processos intervieram para que a transição se realizasse —não podemos dizer, sequer, se se trata do *mesmo* elétron. Ainda mais, o conhecimento de que num dado instante o elétron se encontrava no estado A não nos permite determinar com precisão que, na observação posterior, o elétron deverá encontrar-se no estado B; devido à própria interferência sobre o sistema ocasionada pela observação original, só podemos predizer a *probabilidade* de que o elétron, dentre uma variedade de estados possíveis, venha a ocupar o estado B. Quanto mais forçamos a determinação precisa de uma dada propriedade do elétron, digamos sua posição, tanto mais tornamos imprecisa uma grandeza complementar (no caso, sua velocidade). Esta perturbadora conclusão, consubstanciada no Princípio da Incerteza de Heisenberg, implica em tamanha revolução das concepções fundamentais da Física clássica que muitos cientistas eminentes, à frente de todos o próprio Einstein, se recusaram por longo tempo a

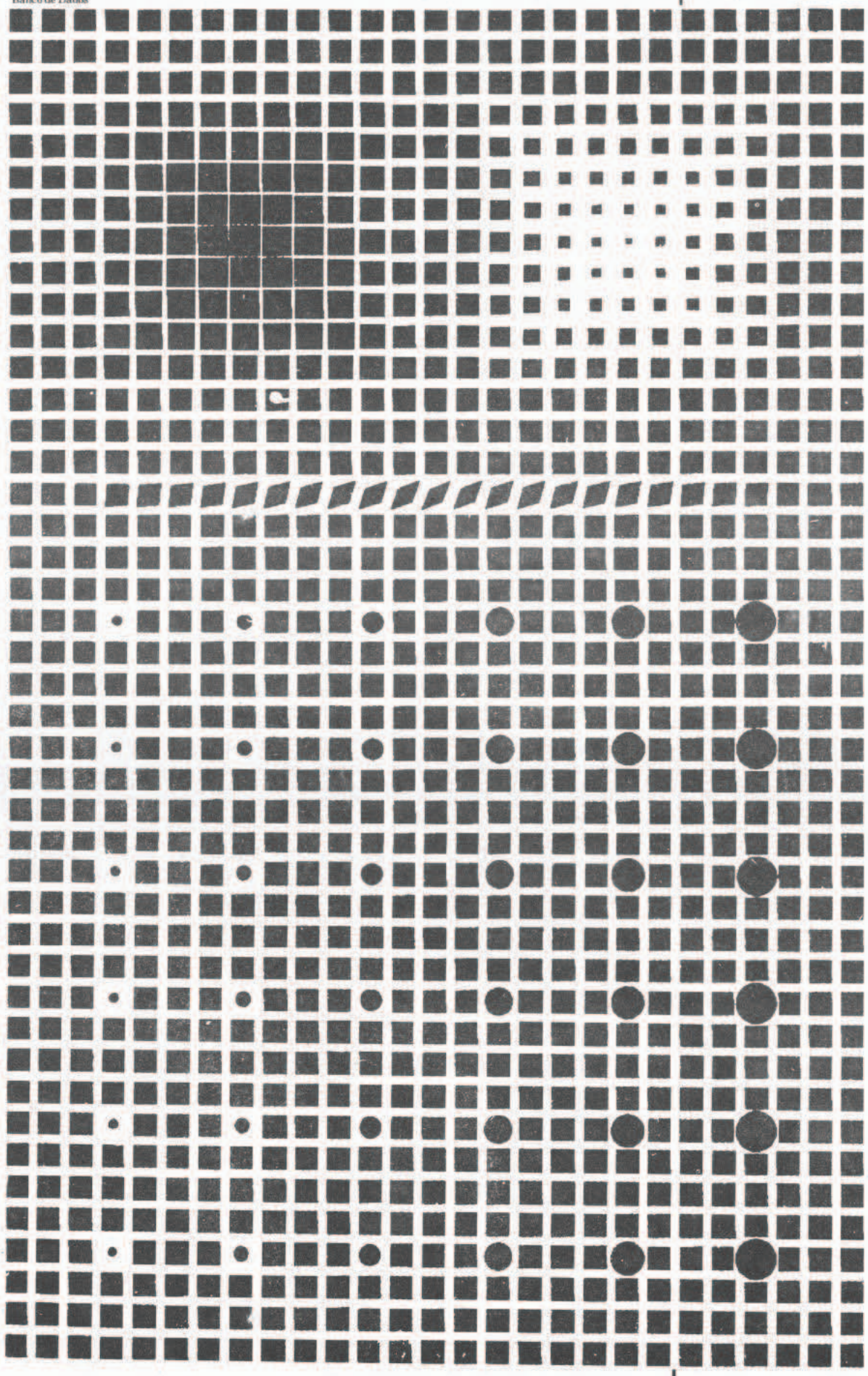
admitir que a paradoxal descrição quântica pudesse ser completa e que fosse de fato irrecuperável a obsolescência das noções tradicionais tão eficazes em nosso mundo do dia-a-dia.

O ACASO TRANSFORMA-SE NO LEGÍTIMO ALICERCE DO MUNDO

A "realidade" quântica, assim, não exibe objetos com propriedades a priori estáveis e bem definidas; por exemplo, de acordo com o aparato experimental que for empregado, um elétron se manifestará ora como um corpúsculo (ou seja, um objeto localizado), ora como uma onda (isto é, um objeto extenso), e portanto não se pode dizer que *em si* seja uma ou outra coisa. Há que abandonar a noção aristotélica de *substância* como o extrato básico de que se compõem as coisas do mundo, bem como toda ambição de uma previsibilidade e determinismo absolutos: toda forma é precária, pois toda essência é imprecisa e se dissolve em acidentes, e o futuro é, inexoravelmente, probabilístico. O que chamamos de "mundo objetivo" seria então a expressão macroscópica de uma trama infindável de relações quânticas que não padecem, elas mesmas, de "objetividade". A explícita reaparição do *observador* e, para alguns, de sua *consciência* como integrantes indispensáveis da operação de definição de "realidade" (como sugerido nos famosos experimentos imaginários do "gato de Schroedinger" e do "amigo de Wigner") é outro aspecto intrigante, e inteiramente avesso à postura cartesiana convencional, acarretado pela teoria. Por outro lado, a recente verificação de que correlações (isto é, coincidências sistemáticas obtidas comparando-se os resultados de diferentes medições) entre sistemas quânticos que estiveram em interação parecem suceder de uma maneira que extravasa os limites de uma física *local* (reintroduzindo assim algum tipo de intercâmbio de informação à distância" —um anátema para a Mecânica pós-newtoniana) conduziu ao abandono do ceticismo de Einstein ("O bom Deus não joga dados") e à consequente afirmação do acaso como legítimo alicerce do mundo. Enfim, a compreensão do panorama proporcionado pela Física Quântica é além disso obstaculizada pela diversidade de "interpretações" que se pode associar ao instrumental quântico (como a da Escola de Copenhague, a dos Múltiplos Mundos, a da Teoria Estocástica, dentre outras); todavia, os variados e difíceis problemas que concernem à apreciação dessas diferentes interpretações constituem tema demasiado vasto e complexo para que possa ser tratado aqui.

Em 1917, Albert Einstein, exclusivamente a partir de princípios primeiros e independentemente de quaisquer evidências astronômicas, produziu em forma definitiva aquele que para Max Born seria "o maior feito do pensamento humano sobre a Natureza, a mais impressionante combinação de penetração filosófica, intuição física e habilidade matemática": a Teoria da Relatividade Geral. Procurando exprimir de forma operacional a noção de que as leis da física deveriam ser invariantes para observadores em estado arbitrário de movimento (ou seja, essas leis devem ser expressas por relações matemáticas que sejam independentes do particular procedimento de etiquetação dos eventos, por meio de um dado sistema de réguas e relógios, empregado por um observador específico), Einstein termina

Banco de Dados



"Supernovae", obra realizada entre 1959 e 61 pelo artista plástico Victor Vassarely, um dos principais representantes da op art

por promover uma fecunda e imprevista combinação entre a interação gravitacional (a força universal de atração entre as massas descoberta por Newton) e a estrutura geométrica do espaço-tempo (o cenário dos eventos físicos), através da qual os observadores podem estabelecer o conceito fundamental de separação ou intervalo entre eventos. Os notáveis sucessos da teoria no que toca a fenômenos gravitacionais e eletromagnéticos na escala de nosso Sistema Solar a instalaram como o quadro conceitual de fundo no interior do qual se pôde assimilar a extraordinária observação de Hubble de que o Universo cósmico se encontraria, como um todo, num estado *dinâmico* de expansao.

O UNIVERSO EVOLUI DE ACORDO COM UM TEMPO CÓSMICO GLOBAL

Com efeito, ao principiar as aplicações da Relatividade Geral à Cosmologia, o próprio Einstein procurou desenvolver um modelo de um Cosmos finito e estático, por ele considerado como o mais pertinente dos pontos de vista da simplicidade e elegância filosófica. As observações de Hubble (o chamado "afastamento uniforme das galáxias") logo inviabilizaram o modelo de Einstein, que cedeu lugar à concepção do universo expansivo e homogêneo de Friedman e Lemaitre que iria servir para consolidar, até a década de 70, o chamado modelo-padrão da "Grande Explosão Quente" (Hot Big Bang).

O que nos interessa aqui é que a inauguração por Einstein dos modelos cosmológicos relativísticos gerou na Física uma figura nova: a idéia de uma *totalidade*, o espaço-tempo, que se estruturaria através das equações da gravitação da Teoria da Relatividade, constituindo assim um modelo matemático do Universo. Com o modelo de Friedman, esta concepção foi suplementada, recebendo o Universo uma dimensão *dinâmica* —o que significa que a configuração dessa totalidade é mutável, o Universo evolui, evolve de acordo com um tempo cósmico global caracterizado pelo afastamento mútuo das galáxias, e referido em termos de uma estrutura privilegiada de "observadores fundamentais", de que a Cosmologia curiosamente não pôde ainda se desvencilhar.

A entrada em cena deste conceito de totalidade introduzido por Einstein vai provocar uma série de questões delicadas, algumas ainda não resolvidas. Por exemplo, ao longo dos anos 70 argumentava-se que o Universo teria tido um começo único explosivo num dado instante finito do passado —a teoria do Big Bang— no qual tudo o que existe deveria ter tido sua origem, inclusive a própria estrutura espaço-tempo. Todavia, os aspectos extremamente problemáticos acarretados por um tal "estado singular originário" ou singularidade inicial —como a divergência (valores infinitos) de grandezas representativas como temperatura e densidade de energia, a ocorrência de horizontes causais que impediriam a homogenização do Cosmos tal como vemos hoje, e a violação, nessa origem, de leis fundamentais como a da conservação da energia— motivaram diferentes tentativas recentes de modificar alguns dos ingredientes básicos que empregamos para representar as características primordiais da totalidade cósmica, de modo a serem suplantadas as dificuldades intrínsecas da abordagem padrão.

Assim, ao longo dos anos 80 a idéia de um Universo Eterno, sem "começo" nem "fim", ganhou substância teórica e vem sendo apontada como a nova visão cósmica que a física produziu. Neste último caso, o Universo se estenderia a partir de uma região no infinito passado que, em um modelo simples, pode ser identificada com o vazio do espaço-tempo e tornaria a esse vazio no infinito futuro. Nosso universo seria assim nada mais do que uma flutuação, um estado transiente, naquela estrutura do espaço-tempo que identificamos com o vazio minkowskiano: uma região isenta de matéria ou de qualquer ação dinâmica, e portanto privada de qualquer manifestação de existência ou processo físico.

Paralelamente a essa revolução nas nossas idéias sobre a totalidade espaço-tempo, os físicos vêm examinando a possibilidade de um casamento entre a Teoria Quântica da matéria e a Cosmologia provocando, por sua vez, questões de fronteira extremamente delicadas. Entre estas, e só para citar um exemplo notável, a idéia francamente audaciosa —(mas cientificamente respeitável, porquanto produzida no contexto da ciência)— de que nosso Universo seria a consequência de um processo que, embora proibido dentro das leis da Física clássica, ganha na Física Quântica uma probabilidade de ocorrer (a criação do Universo por "tunelamento quântico").

Assim, nosso Universo teria uma probabilidade não nula de existir a partir de uma flutuação do "vazio quântico". Mas quem mediria essa probabilidade? Quer dizer, se definimos nossa totalidade cósmica como um evento quântico, que procedimento observacional a teria retirado do "limbo" quântico dos estados não-observados, do oceano de Universos possíveis, mas irrealizados (pelo menos por nós), associados a outras flutuações?

Alguns cientistas foram obrigados por essa e outras questões análogas a reverem os dogmas da interpretação tradicional da Escola de Copenhague, para que a concepção de um Cosmos Quântico (uma totalidade que se auto-observaria) pudesse ganhar sentido.

Finalmente, ainda no campo dos problemas da totalidade deveríamos citar a idéia de Unidade do Mundo, que vem dominando o pensamento teórico nos últimos anos. Segundo essa idéia, a física deveria ser descrita por uma única estrutura física, da qual todos os fenômenos observados seriam exemplos especiais não essenciais (ou seja, subordinados e fortuitos) dela derivados. Se, por um lado, tal pode ser entendido como um truque matemático de simplificação linguística da Física, se tomada em seu aspecto mais profundo essa concepção nos projeta imediatamente na questão da Unidade do Mundo: teriam efetivamente todos os fenômenos que observamos uma mesma causa ou proveniência física?

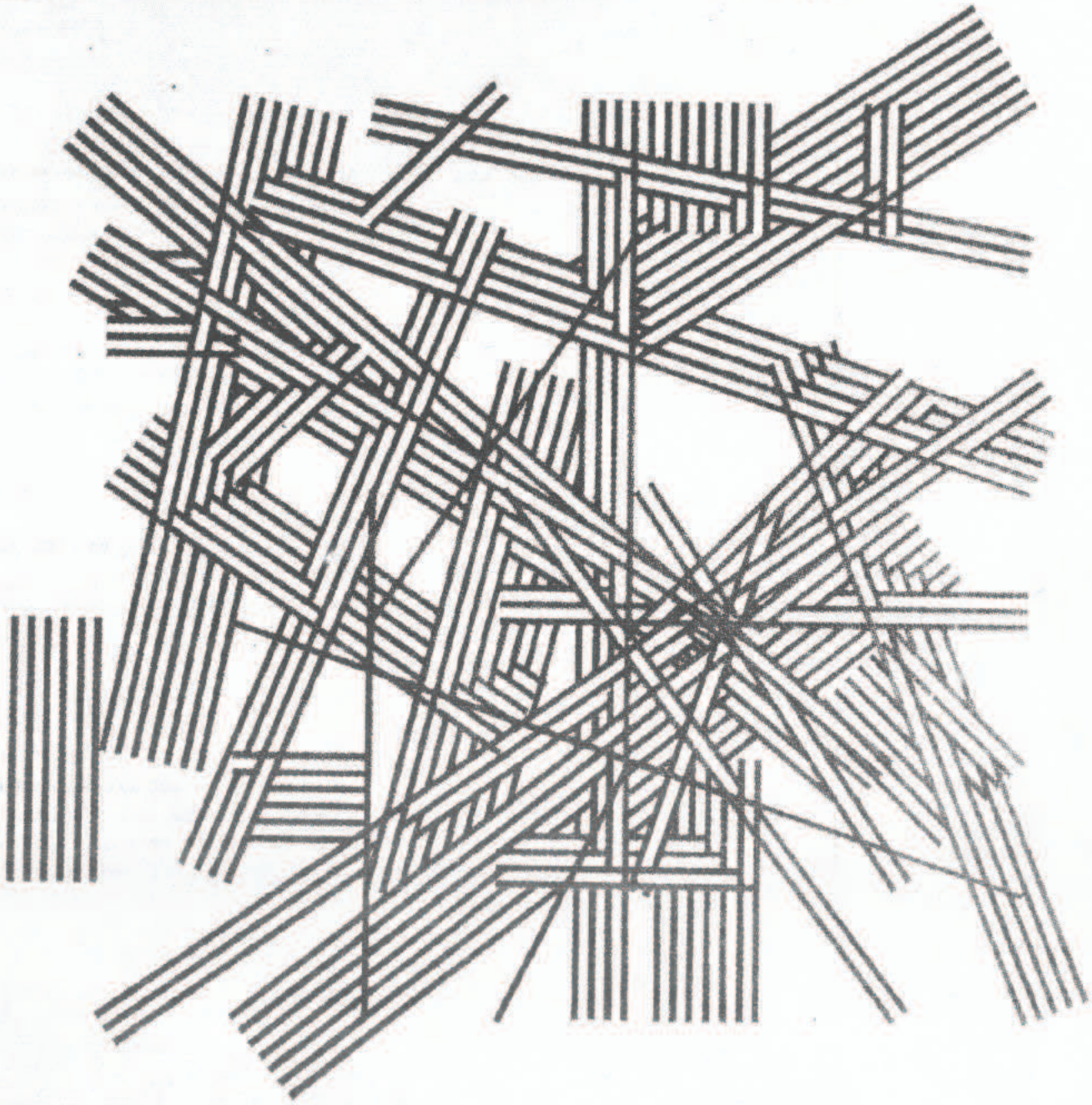
Ainda que a aspiração por uma explicação abrangente, por uma base comum que permitisse a descrição unificada de todos os processos naturais tenha acometido pensadores de múltiplas matizes ao longo dos séculos, a preeminência dessa busca em nossa época, impregnada pelas concepções harmônicas e globalizantes de Einstein, nos induz a denominá-la de "Programa da Unificação de Einstein" (1). É talvez importante citar aqui que uma tal procura de unidade está longe de constituir um programa adotado pela unanimidade dos físicos. Poderíamos contrastar esse programa de Einstein em prol da obtenção de uma ordem justa e determinada para o Universo ao "programa de Boltzmann", no qual se procuraria fundamentar a descrição dos processos físicos a partir de um estado primordial de "caos". A origem dessa busca de unidade, de fato, vamos encontrá-la na antiga aspiração por uma unificação das causas dos fenômenos físicos.

REGIMES "CAÓTICOS" TORNAM O FUTURO INCOGNOSCÍVEL

O pressuposto básico de que conhecer o mundo é conhecer as causas dos fenômenos observados traduz com exatidão a posição preeminente do conceito de *causa* na Física. Já com Galileu e Newton esse conceito tinha ganho um conteúdo novo e um outro valor na constituição da representação do mundo físico moderno. O conceito de causalidade passa então a ser ligado de modo indissociável aos conceitos de força e de ação a distância, exprimindo com nitidez a natureza abstrata das noções que estão na base da

1. O "Programa de Einstein" é discutido em profundidade em "Cosmos e Contexto", de Mario Novello (Forense, Rio, 1988).

Banco de Dados



"Chance and Order 10 (Monastral Blue)", do inglês Kenneth Martin

Física moderna. A idéia de causalidade se traduz pela afirmação de que todo evento é produzido pelos corpos em suas interações com sua causa (antecedência); desse modo constitui-se um critério de ordenação segundo uma anterioridade e uma posterioridade que permite representar os acontecimentos por séries de eventos denominados séries causais. A *natureza* da causa dos eventos é desse modo colocada entre parênteses, o conteúdo explicativo da nova Física se reduz assim à ordenação dos eventos e à eficácia preditiva introduzida pelo conceito de força e pelos demais conceitos abstratos como trabalho e energia que dela decorrem. Esse modo de abordar o mundo físico atende de maneira eficiente as necessidades de um pensamento que, mantendo a tradição cartesiana, visa introduzir na matéria caótica do mundo a ordenação inequívoca do pensamento matemático.

A representação do mundo físico que se obtém com esses conceitos é determinista e elimina totalmente a natureza virtual e a duração (durée) dos acontecimentos; o tempo se reduz a um parâmetro, uma coordenada destinada apenas a marcar os eventos cuja existência é a priori garantida pelos movimentos que se observam na matéria. Esse modo de construir a representação do mundo físico e implementar a noção associada de estrita causalidade é realizado de maneira definitiva e rigorosa pelo matemático francês Cauchy, expressando os fenômenos do mundo físico por equações diferenciais e pelo problema de dados iniciais a elas associado. Dessa forma se produz de modo transparente a eliminação cabal da questão da natureza do tempo.

Como mencionamos anteriormente, essa concepção do mundo físico e a atualização da idéia de causalidade elaboradas pela Física clássica (especialmente a Mecânica) sofreu a sua primeira grande crise quando do advento da Mecânica Quântica, cuja natureza essencialmente probabilística elimina a possibilidade de uma previsibilidade absoluta ou determinação ilimitadamente precisa do futuro (embora a noção de complementariedade e a interpretação estatística da Escola de Copenhague constituíssem uma tentativa renovada de manter essa previsibilidade e determinismo típicos da Física clássica). Apesar do intuito dos físicos de construir uma representação inteiramente determinista onde o futuro é completamente determinado pelo passado, não restando nenhum papel criativo e produtivo para a duração e a virtualidade, há atualmente diferentes exemplos de situações que rompem com esse modelo do mundo. Entre esses, os mais dramáticos não são somente aqueles que derivam da Mecânica Quântica, mas também os que decorrem da Teoria da Relatividade e, paradoxalmente, da própria Mecânica clássica em sua versão moderna. De acordo com a teoria de Einstein, um sistema físico em um estado bem definido pode, depois de um intervalo de tempo finito, transformar-se em um estado não-físico denominado singularidade onde as noções de espaço e tempo tornam-se sem sentido (como no caso do Big Bang que citamos acima). Não é possível saber o que ocorre em uma singularidade e o que dela pode emergir no mundo físico, impedindo totalmente a previsibilidade do futuro (ou a recuperação do passado). Na Mecânica clássica, outros exemplos vieram a ser conhecidos, especialmente na moderna teoria dos sistemas dinâmicos onde problemas de estabilidade, em sistemas muito complexos ou muito afastados do estado de equilíbrio impedem do mesmo modo o conhecimento determinístico da evolução do processo em questão, pois aspectos como bifurcações, transições globais de ordem e regimes "caóticos" tornam o futuro incognoscível. Frisemos bem: na descrição de tais processos se faz explícita uma pluralização dos efeitos associáveis a certa causa, ou seja, a uma dada configuração inicial variadas configurações finais poderão ser legitimamente (e imprevisivelmente) associadas.

Concluimos assim que a Física e a Cosmologia correntemente delineam o panorama de um mundo natural dessubstancializado, indeterminista, evolutivo, casual e até mesmo indivisível (como parece implicar a "comunicação instantânea à distância", que, como vimos, foi recentemente constatada em fenômenos não-locais de correlação em processos microfísicos). Os exemplos citados constituem nítidas evidências de que o quadro causal e determinista herdado da cosmovisão clássica e ainda dominante na Física contemporânea necessita ser reavaliado e ampliado. Em nossos dias, diferentes esforços e abordagens críticas buscam concretizar esses objetivos renovadores, sugerindo que a manutenção de uma postura totalizante, estritamente causal e determinista manifesta não a natureza dos eventos físicos ela mesma, mas sim uma necessidade de dominação e cristalização dos fluxos de acontecimentos, trazendo ecos do antigo dogmatismo cristão. □